

## Metoda synchronizacji i obróbki danych pozyskanych z różnych zestawów czujników inercyjnych na potrzeby analizy chodu człowieka

Aleksandra Góźdz, Maciej Kalinowski\*, Piotr Kopniak

Politechnika Lubelska, Instytut Informatyki, Nadbystrzycka 36B, 20-618 Lublin, Polska

**Streszczenie.** W artykule przedstawione zostały wyniki badań dotyczących synchronizacji danych pozyskanych z dwóch systemów akwizycji ruchu na potrzeby analizy chodu człowieka. Oba systemy to zestawy czujników inercyjnych firmy Xsens: MT Awinda i Xbus Kit. W artykule omówiony zostanie format pliku do zapisu danych uzyskanych z pomiarów, oraz opracowana metoda synchronizacji pomiarów pochodzących z obydwu zestawów. W wyniku przeprowadzonych badań udało się także ujednolicić dane generowane przez czujniki umiejscowione w różnych miejscach na ciele człowieka do jednego układu odniesienia. Opracowana metoda zapewnia także progresywne przetwarzanie wartości kątów z zakresu od  $-180^\circ$  do  $180^\circ$  na wartości bezwzględne w stosunku do położenia początkowego czujników.

**Słowa kluczowe:** akwizycja ruchu; czujniki inercyjne; synchronizacja pomiarów; przetwarzanie danych; Xsens; Java.

\*Autor do korespondencji.

Adres e-mail: [koliczyna@gmail.com](mailto:koliczyna@gmail.com)

## Method of synchronization and data processing from different inertial sensors kits sources for the human gait analysis

Aleksandra Góźdz, Maciej Kalinowski\*, Piotr Kopniak

Institute of Computer Science, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 36B, 20-618 Lublin, Poland

**Abstract.** The article talks about results of data synchronization measurements sourced from two recording gait systems for human gait analyses. Two systems are Xsens sensor kits: MT Awinda, Xbus Kit. The article cover file format used to save data and synchronization method for sensor measurement from above mentioned kits. On the basis of the studies carried out, sensor measurement from different places on human body are unify to a common frame of reference. The discussed method provides also progressive data processing for angles range from  $-180^\circ$  to  $180^\circ$  conversion to the absolute angle value from initial sensor settings.

**Keywords:** motion capture; inertial sensors; measurement synchronization; data processing; Xsens; Java.

\*Corresponding author.

E-mail address: [koliczyna@gmail.com](mailto:koliczyna@gmail.com)

### 1. Wstęp

Postęp technologiczny sprawił, że dzięki coraz bardziej precyzyjnym urządzeniom możemy zbadać ruch człowieka. Czujniki inercyjne pomimo niewielkich rozmiarów są w stanie odczytać wiele istotnych informacji. Takie dane mogą być wykorzystywane w określeniu patologii chodu, które wynikają z chorób kręgosłupa [1], rehabilitacji osób chorych na Parkinsona [2, 3], bądź leczeniu osób niepełnosprawnych, które odzyskują możliwość poruszania się lub zakładają protezy [4]. Dzięki takim danym przebieg leczenia i powrotu do zdrowia może być nie tylko szybszy, ale także skuteczniejszy. Dodatkowo dzięki czujnikom ruchu możliwe jest stworzenie naturalnego interfejsu sterowania, np. robotami [5, 6]. Dokładność analizy ruchu zależy między innymi od liczby czujników oraz ich umiejscowienia na badanym obiekcie, dlatego tak ważna może okazać się synchronizacja i obróbka danych inercyjnych z wielu źródeł. Istotnym problemem badawczym jest opracowanie skutecznych metod synchronizacji i obróbki danych uzyskiwanych z różnych urządzeń pomiarowych [7].

Przeprowadzone badania opisane w tym artykule miały na celu opracowanie sposobu zestrojenia próbek danych

rejestranych przez dwa zestawy czujników inercyjnych firmy Xsens: MT Awinda (3 czujniki bezprzewodowe) oraz Xbus Kit (2 czujniki przewodowe). Do pomiarów wykorzystane zostało specjalnie napisane oprogramowanie. Część wykonanych operacji można byłoby dodatkowo zautomatyzować już przy pobieraniu danych z Xsensa, ponieważ firma udostępnia SDK (zestaw narzędzi dla programistów) do swoich czujników. Przykładem użycia tego SDK może być praca [8], w której przedstawione zostało stworzenie wrappera w języku Java na SDK Xsensa. Taka optymalizacja miałaby uzasadnienie przy użyciu masowym, do celów badawczych łatwiejsze jest przetwarzanie danych bezpośrednio z plików pomiarowych.

W czasie pomiarów czujniki były zamontowane odpowiednio na: biodrach oraz symetrycznie na udach, goleniach oraz stopach. Dlatego każdy plik z pomiarami ma inny lokalny układ odniesienia.

W badaniach wzięło udział 10 osób, każdy badany przeszedł 8 razy dystans 10 metrów. Pierwsze 4 przejścia badanego odbyły się z czujnikami na: biodro, lewe udo, prawe udo, lewą goleń, prawą goleń. Ostatnie 4 przejścia

z nałożonymi czujnikami na: biodro, lewe udo, prawe udo, lewą stopę, prawą stopę.

Niepoprawnie przeprowadzona synchronizacja prowadzi do błędnego zestawu danych przy analizie ruchu, co z kolei może skutkować złymi wnioskami z przeprowadzonego badania bądź eksperymentu

## 2. Przegląd literatury

Opracowana metoda wynika z przeglądu prac dotyczących ogólnej synchronizacji czasów zestawów pomiarowych tylko na podstawie danych otrzymywanych z poszczególnych czujników.

W opracowaniu [9] autorzy przedstawiają metodę na synchronizację pomiarów z czujników rejestrujących fale sejsmiczne za pomocą wyszukania tej samej fali zarejestrowanej przez każdy czujnik, a następnie wyrównanie zarejestrowanego czasu w każdym pomiarze poprzez zastosowanie przesunięcia.

Badania [10] sugerują aby dodatkowo wywołać ręcznie zdarzenie, które zostanie zarejestrowane przez wszystkie czujniki np. wstrząśnięcie wszystkimi czujnikami w jednej chwili, wydanie dźwięku, błysku, w zależności od danych jakie czujniki rejestrują. Następnie można w łatwy sposób odnaleźć takie wydarzenie w pomiarach z oddzielnych czujników i zsynchronizować czasy danych pomiarowych.

## 3. Czujniki inercyjne firmy Xsens

Czujniki inercyjne dzięki jednoczesnemu zastosowaniu żyroskopu, magnetometru i akcelerometru umożliwiają pomiar położenia przestrzennego obiektu oraz jego ruchu względem osi trójwymiarowego układu współrzędnych. Pomiary są wykonywane z częstotliwością 100Hz oraz eliminację błędów pomiarowych (Xsens) [11].

Firma Xsens dostarcza czujniki oparte o technologię MEMS (mikroukład elektromechaniczny) [12]. Firma ta opracowała jednostki inercyjne, systemy pomiaru ruchu człowieka oraz technologię Sensor Fusion, która pozwala na

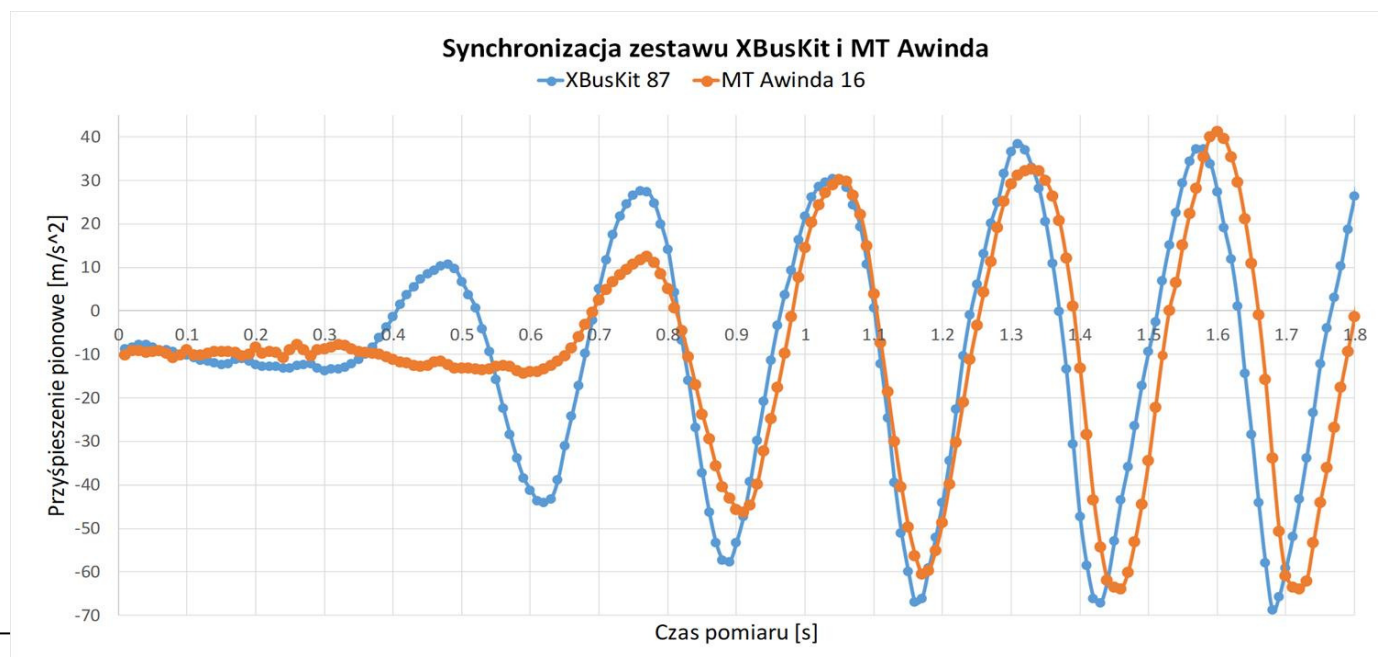
płynne pomiary rzeczywistości, dzięki zgrupowaniu kilku czujników w jeden zestaw i jednocześnie zapisywane na komputerze danych pomiarowych z całego zestawu.

W badaniach zostały wykorzystane czujniki z zestawu Awinda (3 czujniki MTw) oraz z XBus Kit (2 czujniki MTx). Łączą się one za pomocą protokołu radiowego umożliwiającego odbieranie i rejestrację danych, czyli śledzenie ruchu osoby badanej w czasie rzeczywistym z minimalnym okresem 10  $\mu$ s między kolejnymi próbkami. Zasięg między czujnikami a stacją wynosi od 20 metrów w pomieszczeniu do 50 metrów na zewnątrz. Natomiast czas pracy czujnika trwa do 6 godzin. Dzięki zastosowaniu specjalnej stacji można jednocześnie pracować z dużą liczbą czujników jednocześnie. Umożliwia ona na komunikację nawet 20 sensorom. Do kolejnych zalet czujników można zaliczyć wagę, która wynosi zaledwie 16 g, oraz ich niewielkie rozmiary.

Każdy czujnik potrafi odczytać następujące parametry w czasie rzeczywistym w trzech osiach przestrzeni trójwymiarowej: prędkość kątową (od -2000 stopni/s do 2000 stopni/s), przyspieszenie (-160 m/s<sup>2</sup> do 160 m/s<sup>2</sup>), pole magnetyczne (-1.9 B do 1.9 B (Gaussa)). Dodatkowo zapewnia informację o rotacji czujnika, kąty przechylenia, odchylenia i pochylenia.

## 4. Metoda synchronizacji czujników inercyjnych

Synchronizacja czujników wykonana na potrzeby opisywanych badań opiera się na wytworzeniu charakterystycznego ruchu dla wszystkich czujników jednocześnie. Charakterystyczny znacznik tworzony jest poprzez jednoczesne wstrząśnięcie czujnikami (po jednym z każdego zestawu) zaraz po włączeniu pomiarów na każdym z zestawów. Taki sygnał jest łatwy do znalezienia w danych inercyjnych dostarczonych przez konkretne czujniki.



Rys. 1. Synchronizacja zestawu XBusKit i MT Awinda

Po zestawieniu ze sobą danych z pierwszych sekund pomiaru, otrzymano następujący wykres przedstawiony na rysunku (Rys. 1).

Przesunięcie pomiarów z zestawu XBusKit dzięki przebiegowi pomiarów o charakterze sinusoidalnym i wielu ekstremom lokalnym jest dobrze widoczne, a po dokładnym sprawdzeniu różnicy czasów próbki z wystąpienia pierwszego znaczącego ekstremum lokalnego można wyrównać czasy startów wszystkich pomiarów jednego zestawu względem drugiego zestawu.

Pozwoliło to na synchronizację na poziomie okresu czasu pomiędzy poszczególnymi próbkami. Przy wybranej częstotliwości urządzeń wynoszącej 100 Hz, niedokładność pomiarowa wynosi zaledwie 0.01s co zapewnia dane wystarczająco zsynchronizowane do przeprowadzenia analizy chodu człowieka.

Jednak, aby można było zaprezentować dane w postaci wykresu należało je wcześniej odpowiednio przetworzyć tzn., przede wszystkim przypisać kolejnym numerom pakietów odpowiadający im czas wystąpienia.

## 5. Opis danych rejestrowanych przez czujniki

Każdy czujnik zapisywał dane w pliku binarnym o formacie "MTB" rozpoznawanym przez oprogramowanie firmy Xsens, które umożliwia wyeksportowanie danych pomiarowych do pliku płaskiego "CSV". Dane w pliku zapisane były w taki sposób, że w każdym wierszu znajdowała się jedna próbka pomiaru. W kolumnach znalazły się:

- 1) numer pakietu - liczba całkowita od 0 do 65535,
- 2) przyspieszenia w kierunkach osi X/Y/Z, m/s<sup>2</sup> (trzy kolumny danych),
- 3) obrót wokół osi X/Y/Z, liczby zmiennoprzecinkowe, kąty od -180° do 180° (w trzech kolejnych kolumnach).

## 6. Ujednolicenie numeracji i dodanie czasu pakietów

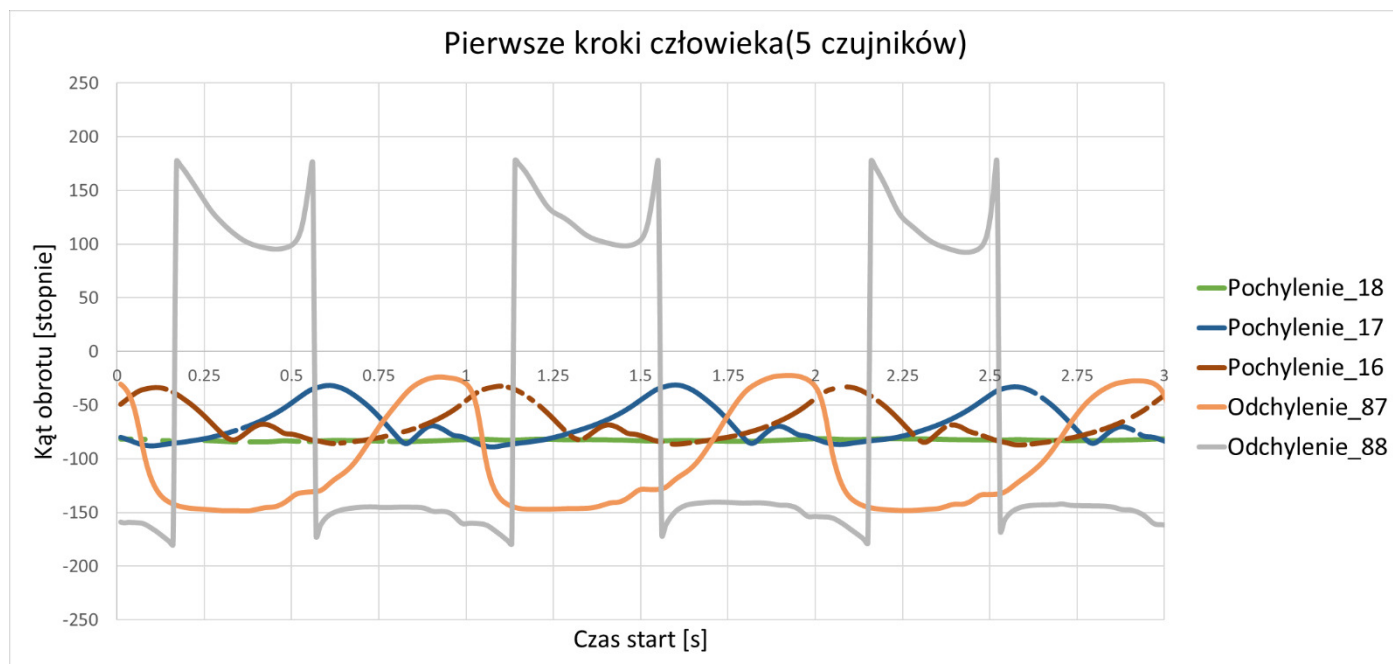
Numer pakietu jest kolejną liczbą całkowitą, której wartość wynosi 1 przy każdym starcie pomiarów i jest cyklicznie inkrementowana dla kolejnych próbek, oraz przeładowuje się po przekroczeniu maksymalnej wartości. W zależności od częstotliwości urządzenia można obliczyć czas między kolejnymi pakietami, np. przy ustawionej częstotliwości urządzenia na 100Hz czas między pomiarami wynosił 0.01s. Znaczącym utrudnieniem w procesie synchronizacji danych pomiarowych okazały się zaginione pakiety, które nie pojawiały się ostatecznie w danych pomiarowych.

Zatem, aby przygotować dane do późniejszej analizy należało je dodatkowo przetworzyć. Przetworzenie polegało na uzupełnieniu pliku o wiersze z indeksami zaginionych próbek, a następnie wyzerowaniu numeru pierwszej danej oraz przenumerowaniu ich względem numeru pierwszej próbki. Na końcu tej operacji każda kolejna próbka miała numer o jeden większy od poprzedniej.

Z tak obrobionych danych można odczytać czas zapisu każdej próbki jest to:

$$\text{czas\_zapisu} = \text{nr\_próbki} * \frac{1}{\text{częstotliwość\_urządzenia}} \quad (1)$$

Aby łatwiej było przetwarzać dane do pliku płaskiego została dodana kolumna z czasem zapisu próbki. Tak przetworzone dane pomiarowe można porównać m. in. w celu synchronizacji czasów pomiarów między dwoma różnymi zestawami. Dokonanie takiej synchronizacji umożliwia poprawną analizę pomiarów i jest ostatnim krokiem obróbki czasów pakietów. Zestawienie zsynchronizowanych pomiarów przedstawia rysunek (Rys. 2). Na legendzie pomiar z każdego czujnika jest podany poprzez słowo oznaczające względem której osi był wykonany pomiar (Pochylenie/Odchylenie) oraz liczba oznaczająca numer identyfikacyjny czujnika.



Rys.2. Zsynchronizowane pomiary kąta obrotu czujników podczas pierwszych kroków człowieka

## 7. Obróbka kątów pochylenia w 3 osiach

Kąt pochylenia przyjmuje wartości od -180 do 180 stopni. Przekroczenie granicy powoduje natychmiastową zmianę znaku czyli przeskok z wartości dodatniej na ujemną i odwrotnie. Zakres kątów zawierający przekroczenia granicy znaku utrudniał analizę obrotów urządzenia, jeśli te były często w okolicach minimalnej i maksymalnej wartości. Widoczne na poniższym rysunku (Rys. 3.) przeskoki wartości sygnału oznaczonego szarą linią były właśnie spowodowane uzyskaniem wartości powyżej 180°. Aby zamienić te kąty na bardziej czytelne z punktu widzenia analizy chodu człowieka należy zamienić je na absolutne wartości obrotów w stosunku do kąta obrotu przy starcie pomiaru. Zrealizowano to za pomocą wykrywania przeskoku większego o 90°, gdzie w zależności od kąta  $\alpha$  przed przeskokiem i kąta  $\beta$  po przeskoku, absolutny kąt  $\gamma$  wynosił:

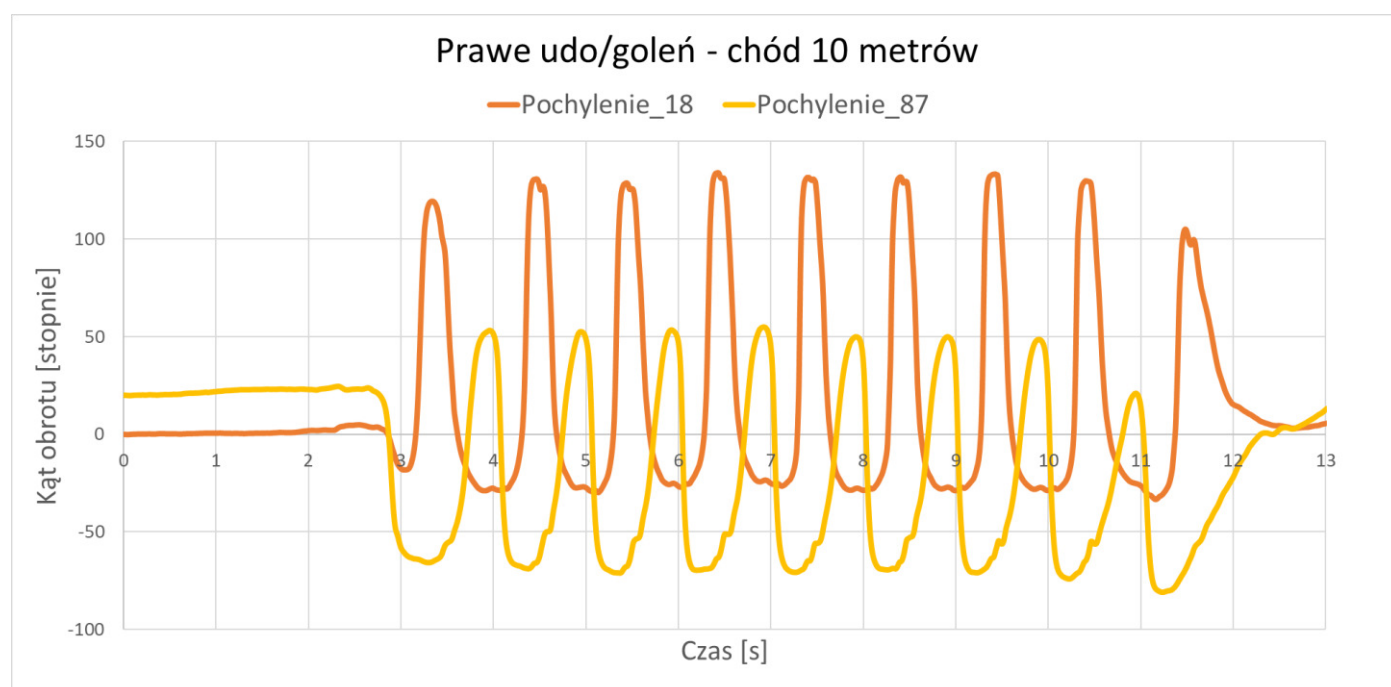
$$180^\circ > \alpha > 0^\circ, -180^\circ < \beta < 0^\circ \quad (2)$$

$$\gamma = 360^\circ + \beta \quad (3)$$

$$-180^\circ < \alpha < 0^\circ, 180^\circ > \beta > 0^\circ \quad (4)$$

$$\gamma = -360^\circ + \beta \quad (5)$$

Taka zmiana zapobiega występowaniu charakterystycznych przeskoków na wykresie. Następnie w zależności od ułożenia czujników, które było najczęściej lustrzane np. lewe udo, prawe udo, należało ujednolicić położenie układów współrzędnych poprzez modyfikację wartości kątów obrotów odbitych symetrycznie względem osi, czyli zmienić na wartości o przeciwnych znakach. Ostatnim krokiem było zrównanie wartości początkowych tak aby śledzenie zmian w cyklu chodu człowieka było łatwiejsze. Przykładem po obróbce danych kątowych może być porównanie przebiegu czasowego zmian kątów prawego uda z prawą golenią (Rys. 3).



Rys.3. Prawe udo/goleń - chód na dystansie 10m

## 8. Wnioski

Pomimo, że nie istnieje dużo źródeł w tematyce synchronizacji danych pochodzących z różnych czujników inercyjnych jest to temat ciekawy badawczo. Pozwala ciągle na opracowywanie nowych rozwiązań począwszy od tych technicznych dotyczących formatu danych zapisanego pomiaru, po zagadnienia związane ze spójnością danych oraz obróbką danych do usprawnienia analizy konkretnego zjawiska.

Opisana wyżej synchronizacja została użyta przy badaniach mających na celu rejestrowanie artefaktów chodu człowieka. Z uwagi na posiadanie dwóch zestawów czujników trzeba było znaleźć sposób na połączenie danych pozyskanych z tych sensorów w całość, aby wyniki były spójne. Opisana metoda sprawdziła się bardzo dobrze, ponieważ dane pochodzące z dwóch niezależnych zestawów opisują zachodzące zjawiska podczas chodu w spójny sposób z dużą

dokładnością pomiarową. Różnica między rzeczywistymi czasami próbek może wynosić najwyżej okres jednej próbki, co daje maksymalny błąd synchronizacji czasu wynoszący 10 ms przy taktowaniach czujników z częstotliwością 100 Hz.

Metoda zapewnia taką samą precyzję jak w metodzie zastosowanej przez zespół Lukaca [9]. Dzięki wykorzystaniu wywołania ręcznego zdarzenia, jak zasugerowano w publikacji zespołu Bannacha [10] cechuje ją niezależność od środowiska w jakim znajdują się czujniki oraz ruchów badanych.

## Literatura

- [1] Haddas R., Ju K. L., Belanger T., Lieberman I. H., The use of gait analysis in the assessment of patients afflicted with spinal disorders, European Spine Journal, 2018
- [2] Schlachetzki J. C. M., Barth J., Marxreiter F., Gossler J., Kohl Z., Reinfelder S. i inni, Wearable sensors objectively measure gait parameters in Parkinson's disease, Plos One, 2017

- [3] Margiotta N., Avitabile G., Coviello G., A Wearable Wireless System for Gait Analysis for Early Diagnosis of Alzheimer and Parkinson Disease, IEEE, 2016
- [4] Chen W., Xu Y., Wang J., Zhang J., Kinematic Analysis of Human Gait Based on Wearable Sensor System for Gait Rehabilitation, Journal of Medical and Biological Engineering, 2016
- [5] Kopniak P., Kamiński M., Natural interface for robotic arm controlling based on inertial motion capture, IEEE, 2016
- [6] Kopniak P., Kamiński M., Żyła K., Zdalne sterowanie ramieniem robota z wykorzystaniem inercyjnych czujników rejestracji ruchu, Logistyka, 2014
- [7] Sacha E., Metody trójwymiarowej analizy ruchu człowieka, Aktualne Problemy Biomechaniki, 2008
- [8] Kopniak P., Java wrapper for Xsens motion capture system, IEEE, 2014
- [9] Bannach D., Amft O., Lukowicz P., Automatic Event-Based Synchronization of Multimodal Data Streams from Wearable and Ambient Sensors, Springer, 2009
- [10] Lukac M., Davis P., Clayton R., Estrin D., Recovering temporal integrity with data driven time synchronization, IEEE, 2009
- [11] Xsens 3D motion tracking, <https://www.xsens.com>, 18.06.2018
- [12] Unmanned Systems Technology, <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2018/07/whitepaper-understanding-xsens-mems-based-motion-trackers/>, 18.06.2018